

Influence d'agents dispersants sur l'ouvrabilité et les propriétés mécaniques des mélanges sol-ciment pour des applications de Deep Soil Mixing

Influence of dispersing agents on the workability and the mechanical properties of soil-cement mixtures for Deep Soil Mixing applications

Manuela TEUKAM SIMEN^{1*}, Anne-Lise BEAUCOUR¹, Javad ESLAMI¹, Albert NOUMOWE¹, Gilles HOVHANESSIAN², Fabien FANCELLI², Philippe GOTTELAND³

1 : *Cy Cergy Paris Université, Cergy, France*

2 : *FAYAT FONDATIONS, Paris, France*

3 : *Fédération nationale des travaux publics, Paris, France*

**manuela.teukam-simen@cyu.fr*

RESUME :

Le Deep Soil Mixing, en malaxant les sols en place avec un liant, contribue à des constructions géotechniques plus durables. Les teneurs en eau requises pour ces procédures de malaxage sont beaucoup plus élevées que l'optimum Proctor requis par le compactage des sols traités pour les chaussées, et plus élevées que celles des bétons traditionnels, car l'argilosité des sols fins implique une plus grande quantité d'eau pour assurer un malaxage efficace et une distribution homogène du ciment dans le matériau. Ceci peut conduire à des surdosages en ciment pour satisfaire les critères de résistance, de perméabilité et de durabilité. Ce travail évalue ainsi l'apport d'additifs chimiques (superplastifiants et dispersants d'argile) sur les possibilités d'amélioration de l'ouvrabilité des mélanges sol-ciment à l'état frais et de diminution du rapport eau/ciment tout en conservant une ouvrabilité acceptable. L'influence de ces adjuvants sur le comportement à l'état frais a été testée sur deux sols d'argilosité différente, du ciment CEM III/C, trois superplastifiants et un dispersant pour des dosages de 1 à 4 %. Les combinaisons les plus efficaces ont été retenues pour une étude de l'évolution des propriétés mécaniques en fonction du temps de cure. Des observations au microscope électronique à balayage et des analyses ATG complètent cette étude pour comprendre les interactions entre l'ajout de dispersant sur l'hydratation du liant et la microstructure du béton de sol.

ABSTRACT: Deep Soil Mixing, by blending in-situ soils with a binder, contributes to more sustainable geotechnical constructions. The water contents required for these mixing procedures are much higher than the Proctor optimum required for compacting treated soils in road construction, and higher than those of conventional concretes, because the clayey nature of fine soils implies a greater quantity of water to ensure effective mixing and homogeneous distribution of cement within the material. This can lead to cement overdosing to meet strength, permeability and durability criteria. This work thus evaluates the contribution of chemical additives (superplasticizers and clay dispersants) on the possibilities of improving the workability of soil-cement mixtures in the fresh state and reducing the water/cement ratio while maintaining acceptable workability. The influence of these admixtures on fresh state behavior was tested on two soils with different clay contents a CEM III/C type cement, three superplasticizers and one dispersant at dosages ranging from 1 to 4%. The most effective combinations were selected for a study of the evolution of mechanical properties as a function of curing time. Scanning electron microscopy observations and TGA analyses complement this study to understand the interactions between dispersant addition on binder hydration and soilcrete microstructure.

Mots-clés: Deep soil mixing ; agents dispersants ; bétons de sol.

1 INTRODUCTION

La Méthode de Malaxage Profond (DMM) ou Deep Soil Mixing (DSM) en anglais est une technologie de

traitement des sols in-situ par laquelle des matériaux liants (chaux, ciments) sont ajoutés et mélangés avec des sols en place, afin d'améliorer les propriétés

hydrauliques et mécaniques de ces sols (Bellato et al, 2013). Développées à l'origine en Suède et au Japon durant les années 1960 et 1970 [1], ces méthodes sont aujourd'hui des procédures bien établies dans la pratique de l'ingénierie géotechnique d'un nombre croissant de pays. Lors de ces procédés, des machines de diverses formes déstructurent le sol en place par voie mécanique ou hydraulique et mélangent progressivement, en s'enfonçant en profondeur, le sol déstructuré avec un coulis de ciment. Le Deep Soil Mixing peut être utilisé pour augmenter la capacité portante des sols sur lesquels reposent des routes, réaliser des murs de soutènement, atténuer les phénomènes de liquéfaction des sols, et même réaliser des fondations profondes [2], [3], [4]. Cette méthode est généralement choisie pour améliorer des ouvrages sur terrain à faible résistance que l'on souhaite réaliser de manière plus écologique car le sol n'a pas besoin d'être excavé ou transporté [5], il y a très peu de vibrations générées (et aucun risque de nuire aux ouvrages environnant) et les liants bas carbone conviennent parfaitement avec ce type de mélange.

Cependant, la composition des sols représente une limite à l'atteinte de certaines performances mécaniques et de durabilité. Les sols cohésifs dont l'amélioration nécessite beaucoup d'eau, ne sont pas très souvent traités par l'application de cette méthode, à cause des très faibles performances mécaniques du mélange obtenu, dues à ces teneurs en eau élevées. En règle générale, ces problèmes sont palliés par l'usage d'additifs chimiques dans le secteur des bétons ordinaires. Les additifs chimiques (ou agents dispersants) sont des agents qui permettent de diminuer les quantités d'eau des mélanges, de garder une bonne ouvrabilité et de maintenir de bonnes performances mécaniques. Cette étude a ainsi pour objectif de comprendre comment des agents chimiques peuvent être utilisés, pour diminuer les teneurs en eau des mélanges sol-ciment. Les superplastifiants (SP) et les dispersants d'argile sont les produits qui ont été retenus pour cette étude. Ces deux agents agissent principalement par répulsion électrostatique et par effet de barrière stérique, permettant de désagglomérer les particules et de les maintenir à distance. Il existe une grande diversité d'agents dispersants, dont l'efficacité repose sur un mécanisme dominant (électrostatique ou stérique), ou sur la combinaison simultanée des deux. Les superplastifiants appliquent ces mécanismes sur les particules de ciment afin de libérer de l'eau piégée entre les grains [6], [7] tandis que les dispersants d'argiles, les appliquent sur les particules d'argile [8]. Dans l'étude réalisée par Ouellet-Plamondon et al. [9], il est montré que l'incorporation de superplastifiant (l'éther polycarboxylate) dans des mélanges sol-ciment

formulés avec du ciment au sulfoaluminat de calcium (CSA) permet de réduire les seuils d'écoulement des pâtes ainsi que les rapports E/C, conduisant à de bonnes résistances en compression. D'autre part, Salvatore et al. [8] ont étudié l'utilisation de dispersants d'argile dans des mélanges sol ciment à base de CEM IV. Les contraintes de cisaillement baissent également grâce aux dispersants, mais les résistances en compression des mélanges avec dispersants sont moins élevées pour des raisons qui ne restent pas très claires. Contrairement aux études précédentes qui ont utilisé des ciments CSA ou CEM IV, la présente recherche se concentre sur l'emploi de CEM III/C. De plus, nous évaluerons l'impact de l'utilisation de ces additifs sur l'étalement, les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microstructurales de quelques mélanges sol-ciment.

2 MATERIAUX ET MELANGES

2.1 Les sols

Deux sols à argilosité différente ont été utilisés dans cette étude : le limon des plateaux et l'argile panachée. Ils ont été choisis en raison de leur teneur en argile, suffisante pour étudier l'influence de la présence d'argile sur l'action des additifs chimiques. Le limon des plateaux contient 18% d'argile (kaolinite, montmorillonite, muscovite) et l'argile panachée contient 48% d'argile (kaolinite, muscovite). Les sols collectés étaient sous forme broyée et approximativement secs ($W_n < 3\%$) avec un D_{max} de 2 mm. Le tableau 1 ci-dessous présente davantage d'informations sur les sols.

Tableau 1: Caractéristiques des sols

Nom	Limon des plateaux	Argile Panachée
Classe GTR	A1	A2
Masse volumique des particules solides (Kg/m^3)	2630	2680
Limite de liquidité (%)	31.1	36.2
Indice de plasticité (%)	12	20
Pourcentage d'argile ($< 2\mu m$)	18.1	48
Type d'argile	Kaolinite, montmorillonite	Kaolinite, illite
Pourcentage de Limon ($2\mu m < x < 63\mu m$)	77.4	51
Pourcentage de Sable ($63\mu m < x < 2 mm$)	4.5	1
Classification de casagrande	Argile peu plastique	Argile peu plastique

2.2 Les liants

Le liant utilisé dans cette étude est le CEM III/C 32.5 N. C'est l'un des liants les plus utilisés en France pour

les mélanges sol-ciment, à cause de son efficacité sur les propriétés mécaniques de ce type de mélange, liée à une meilleure compatibilité avec les sols par rapport à d'autres types de ciments[10], [11]. Il est de la marque EQIOM et constitué de 85% de laitier de haut fourneau (co-produit de la production de la fonte) et 15% de clinker.

Tableau 2: Caractéristiques du liant

Liant	Masse volumique (Kg/m ³)	Surface spécifique(C m ² /g)	C3S
CEM III/C	2920	4591	70

2.3 Les agents dispersants

Les additifs chimiques testés dans cette étude proviennent de l'entreprise Masters builders. Il s'agit de trois superplastifiants (SP) et un dispersant d'argile. Les superplastifiants sont ceux à utiliser pour les bétons ordinaires, et les dispersants d'argile sont des produits chimiques utilisés lors du conditionnement des sols dans les tunneliers. Ci-dessous des informations complémentaires sur ces produits (Tableau 3).

Tableau 3: Caractéristiques des superplastifiants

	Additifs chimiques	Masse volumique (Kg/m ³)	pH	Composition
Superplastifiants (SP)	Master Ease 3700	1080	5,7	Ether polycarboxylate (PCE)
	Master Coore 3072	1071	9,4	-
	Chryso	1090	4	-
Dispersant d'argile	MasterROC ACP 226	1110	4,8	Polyacrylates

2.4 Préparation des mélanges

Les mélanges ont été conçus afin d'obtenir 1 m³ de béton de sol. La composition par m³ comprenait : 210 kg de ciment [1], une quantité d'eau permettant d'obtenir un étalement au mini-cône MBE de 18 ± 1 cm (NF EN 12350-5), et une quantité de sol complétant le volume jusqu'à 1 m³. Les dispersants d'argile ont été dosés de 1 à 4% par rapport à la masse de sol sec (soit 4 à 16% de la masse de ciment), et les superplastifiants de 4 à 16% par rapport à la masse de ciment. Suite à des tests de laboratoire, ces dosages représentent ceux nécessaires pour observer des changements d'ouvrabilité des mélanges sol-ciment avec les procédés utilisés.

2.4.1 Préparation des mélanges sans additifs chimiques

Des mélanges sans additifs ont été réalisés afin de servir de référence. Le sol et le ciment ont d'abord été mélangé à 70 trs/min pendant 3 min et ensuite l'eau a été ajoutée et le mélange final a duré 10 min[1], [12], [13]. Le tableau 4 suivant présente les paramètres des formulations de référence.

Tableau 4: Paramètres des mélanges de référence

Mélanges	E/C	Teneur en eau totale (%)	Teneur massique de ciment par rapport au béton (%)
Limon des plateaux + Liant + eau	2,53	42,1	13,2
Argile panachée + Liant + eau	2,93	58,5	14,4

2.4.2 Préparation des mélanges avec additifs chimiques

Le processus de mélange avec dispersants et superplastifiants diffèrent.

Pour les mélanges contenant du dispersant, un protocole spécifique a été adopté afin de permettre l'action du dispersant sur les particules argileuses[14], [15].

Méthode 1 : La procédure de malaxage a été réalisée en trois étapes : (i) pré-mélange du sol, de l'eau et du dispersant pendant 5 min, (ii) période de repos de 5 min, et (iii) incorporation du liant sous malaxage pendant 10 min.

Pour les mélanges contenant du superplastifiant, trois protocoles de malaxage distincts ont été testés. En effet, au vu de l'action des superplastifiants sur les particules argileuses[7],[8], l'hypothèse des superplastifiants qui dispersent les argiles en augmentant l'espace interfeuillet était à tester. Cette hypothèse a été prise en compte sans oublier le fait que les superplastifiants sont censés disperser les particules de ciment[18]. Ainsi les trois protocoles sont:

Méthode 2 : (i) mélange des 2/3 de la solution (eau + superplastifiant), du sol et du ciment pendant 5 min, (ii) période de repos de 5 min, (iii) incorporation du 1/3 restant de la solution (eau + superplastifiant) sous malaxage pendant 5 ou 10 min.

Méthode 3: (i) mélange des 2/3 de la solution (eau + superplastifiant) et du sol pendant 5 min, (ii) incorporation du 1/3 restant de la solution (eau + superplastifiant) et du ciment sous malaxage pendant 5 ou 10 min.

Méthode 4: (i) mélange de la solution eau + superplastifiant avec du ciment pendant 3 min, (ii) incorporation du mélange dans le sol et malaxage pendant 5 ou 10 min.

3 RESULTATS

3.1 Influence du procédé de malaxage lors de l'ajout du superplastifiant

L'influence de l'ordre d'introduction du superplastifiant, ciment et sol, sur l'étalement des bétons est présentée dans la Figure 1. L'argile panachée, le superplastifiant Master Co₂re 3072 à 4% et le CEM III/C ont été utilisés comme matériaux pour réaliser les tests. A l'issue de ces derniers, il a été constaté que les méthodes 2 et 3, permettaient une moins bonne exploitation du pouvoir fluidifiant des SP comparativement à la méthode traditionnelle (Méthode 4). Dans la figure, bien que les différences entre les étalements des méthodes 2 et 4 semblent légères, les étalements obtenus avec de la méthode 3 permettent de donner un indice sur le procédé le plus approprié. En effet à travers les résultats de la méthode 3 et l'expérience des mélanges réalisés en laboratoire, on constate qu'un prémélange du sol, de l'eau et du superplastifiant seul entraîne une perte de fluidité des mélanges sol-ciment, car les argiles consomment le superplastifiant censé agir sur le ciment [17]. C'est ce qu'on réalise partiellement dans la méthode 2, en prémélangeant le sol, l'eau, le ciment et le SP. A priori, il est plutôt préférable d'effectuer un prémélange de ciment, de superplastifiant et d'eau seuls, pour que son action soit efficace, avant d'ajouter la solution au sol.

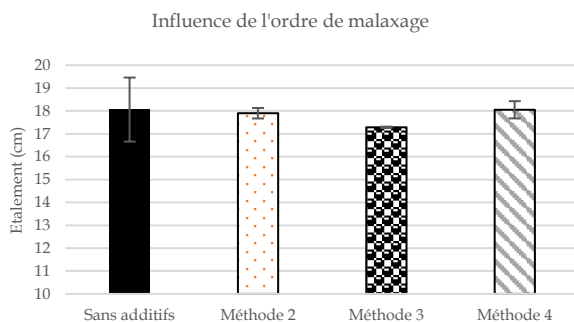


Figure 1 : Influence de l'ordre de malaxage des formulations avec SP sur les valeurs d'étalement des mélanges sol-ciment

3.2 Influence des additifs chimiques sur l'étalement des mélanges sol-ciment

L'objectif étant d'exploiter les propriétés fluidifiantes des additifs chimiques pour réduire les teneurs en eau des mélanges sol-ciment, il a d'abord été vérifié si leur

ajout à E/C constant pouvait améliorer les valeurs d'étalement.

3.2.1 Effets des superplastifiants sur l'étalement

Pour évaluer l'effet de l'ajout de superplastifiants sur l'étalement des mélanges sol-ciment, trois superplastifiants ont été mélangés aux deux sols (limon et argile) à des dosages de 4 et 8% par rapport à la masse de liant, et les valeurs d'étalement au MBE (en raison d'une consistance similaire à celle des mortiers) ont servi de base de comparaison. Les résultats montrent un comportement quasi similaire pour les bétons à base de limon des plateaux et d'argile panachée, ainsi que celui des divers superplastifiants. L'ajout de 4% de SP dans les bétons à base des deux sols, augmente les valeurs d'étalements de 1 cm en moyenne, tandis qu'avec 8% de SP, on atteint environ 3 cm d'étalement supplémentaires (Figure 2, Figure 3). Ces observations montrent qu'autour de 3 à 4% d'ajout, se trouve un dosage de superplastifiant suffisant pour saturer les argiles, de façon à permettre à cet additif d'améliorer l'ouvrabilité des mélanges sol-ciment sans être davantage gêné par leur présence. Par ailleurs, d'autres tests réalisés avec le SP MC 3072 montrent qu'à 12 et 16%, les étalements sont encore meilleurs (Figure 4) sans pour autant nuire à la prise du ciment.

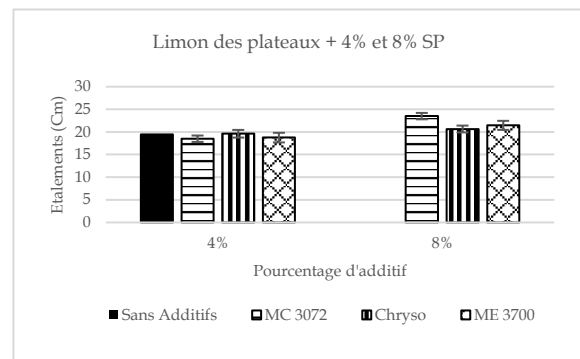


Figure 2 : Influence de l'ajout d'4% et 8% de SP sur les valeurs d'étalement sur les bétons à base de limon des plateaux

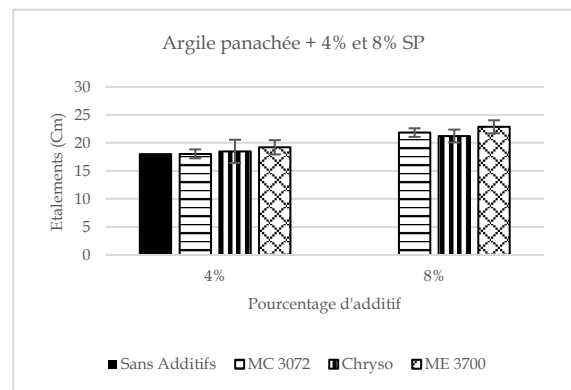


Figure 3 : Influence de l'ajout d'4% et 8% de SP sur des valeurs d'étalement des bétons à base d'argile panachée

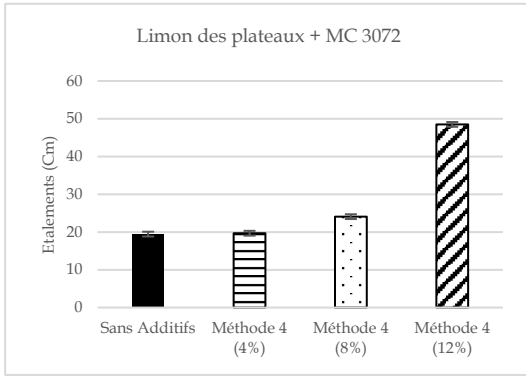


Figure 4: Influence de l'ajout d'4%, 8% et de 12% de MC 3072 sur des valeurs d'étalement des bétons à base limon des plateaux

3.2.2 Effets des dispersants d'argile sur l'étalement

L'ajout progressif du dispersant d'argile dans les formulations des mélanges sol-ciment, a révélé une amélioration croissante de l'ouvrabilité de ces mélanges au fur et à mesure de son ajout comme le montrent les figures 5 et 6.

L'effet bénéfique de cet additif sur l'étalement des bétons d'argile commence dès 1% d'ajout, tandis que pour les limons des plateaux, elle commence à 2% d'ajout. Selon les travaux de Salvatore et al. [8], ce comportement s'explique par la présence de groupes silanols (Si-OH) moins nombreux sur les

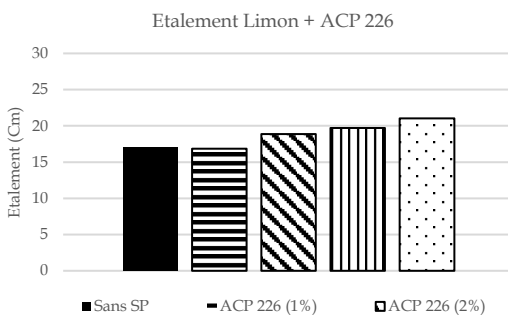


Figure 5: Influence de l'ajout de ACP 226 sur des valeurs d'étalement des bétons à base de limon des plateaux

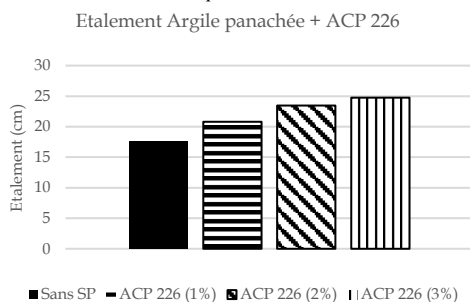


Figure 6 : Influence de l'ajout de ACP 226 sur des valeurs d'étalement des bétons à base d'argile panachée

montmorillonites (uniquement présents sur les bords) par rapport aux kaolinites (présents sur les bords et les faces), ces sites étant importants pour que ces additifs appliquent leurs mécanismes de dispersion.

À la suite de ces tests, des éprouvettes de béton de sol ont été réalisées afin de suivre l'évolution de leur prise et de leur durcissement. Il a été constaté que pour les échantillons contenant plus de 2% de dispersant, la phase de durcissement ne commence pas même après 1 semaine de cure. Le pH acide du dispersant (4,8), ainsi que l'utilisation du CEM III/C pour ces tests, peuvent en être les causes. En effet, pour que le béton à base de CEM III/C produise des C-S-H, il faut que le pH soit suffisamment élevé (signe de la production de portlandite), pour dissoudre les laitiers de haut fourneau (riches en SiO₂). Au delà de 2% de dispersant acide, le pH ne s'élève pas suffisamment pour permettre la prise même après 1 semaine. Ce retard de prise diffère également en fonction des sols. Les limons des plateaux ont fait prise plus rapidement que l'argile panachée, différence probablement liée à leur teneur en argiles car plus celle-ci est élevée, plus les réactifs nécessaires à l'hydratation sont immobilisés. Ainsi, nous avons travaillé avec dosages de dispersant inférieurs ou égaux à 2% par rapport à la masse de sol.

3.3 Réduction du E/C à l'aide des dispersants d'argile pour une même ouvrabilité

Grâce à l'amélioration des étalements apportée par l'ACP 226, il est possible de réduire les rapports E/C tout en conservant un étalement moyen de 18 ± 1 cm (Figure 7). Les dosages de 1% et 2% d'additifs ont été retenus. L'ajout de 2% de dispersant d'argile permet de réduire le rapport E/C de 15% pour les mélanges à base de sol argileux et 1,58% pour les mélanges à base de limon des plateaux.

En parallèle, les masses volumiques des mélanges à l'état frais augmentent avec la diminution des quantités d'eau et par conséquent avec l'ajout de dispersant.

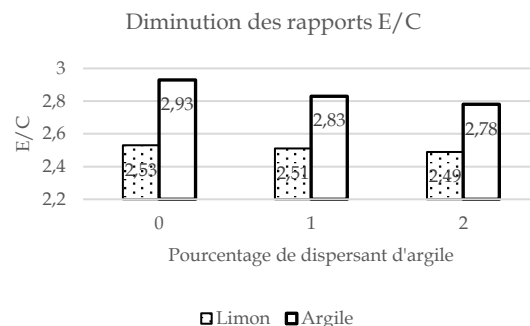


Figure 7: Diminution des rapport E/C à l'aide du dispersant d'argile pour les deux bétons

3.4 Influence sur les propriétés physiques et mécaniques des éprouvettes durcies

Globalement, l'introduction de dispersant conduit à des formulations légèrement plus denses et moins poreuses (Figure 9) que les mélanges de référence en raison de leur teneur en eau réduite. Dans le même ordre d'idées, les bétons de sols d'argile panachée, formulés avec plus d'eau ont une masse volumique moins élevée et une porosité à l'eau plus importante que les bétons à base de limon des plateaux. Du point de vue mécanique, les mélanges contenant des dispersants sont moins résistants que les formulations de référence (Figure 8), quel que soit l'âge des éprouvettes. Les analyses thermogravimétriques et les observations aux images MEB permettent d'expliquer ces différences.

Il est également observé que pour le limon des plateaux, les écarts de rigidité/résistance s'accroissent avec le temps, tandis que pour l'argile panachée, ils tendent à se réduire.

Les pertes de résistance dues aux dispersants sont plus importantes pour l'argile (57%) par rapport aux limons (38%), ce qui peut être attribué à la différence de teneur en argile des deux sols.

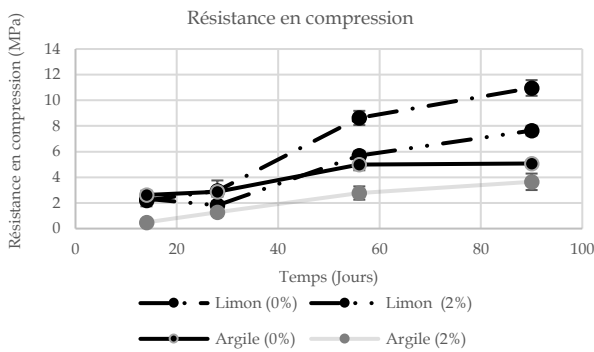


Figure 8: Evolution de la résistance en compression dans les bétons de référence et les bétons avec dispersants

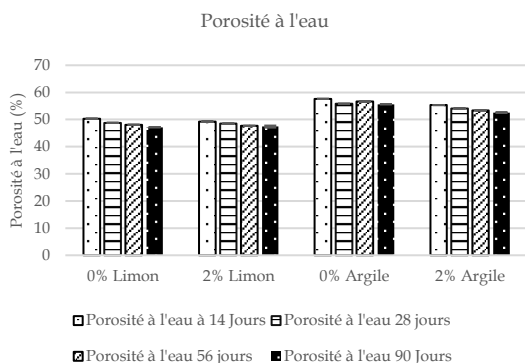


Figure 9: Evolution de la porosité à l'eau dans les bétons de référence et les bétons avec dispersant

3.5 Influence des dispersants d'argile sur l'hydratation des bétons

Les courbes de thermogravimétrie (TG) et de dérivée thermogravimétrique (DTG) permettent d'identifier et de quantifier les produits d'hydratation du ciment, donc de mieux comprendre la chimie interne du matériau.

D'après les courbes TG/DTG (Figure 10) des bétons de référence à 28 jours, des pertes de masse correspondant à la déshydratation des silicates de calcium hydratés (C-S-H), ettringites et CA-S-H entre 100°C et 200°C est d'environ 9,35 à 9,93 % pour les deux bétons de référence. Par contre, pour les bétons contenant de l'ACP 226, elle est de 2,98 % pour l'argile panachée et de 6.56 % pour le limon des plateaux. Ainsi, l'ACP 226 ralentirait la production d'hydrates à 28 jours nécessaire au développement des résistances.

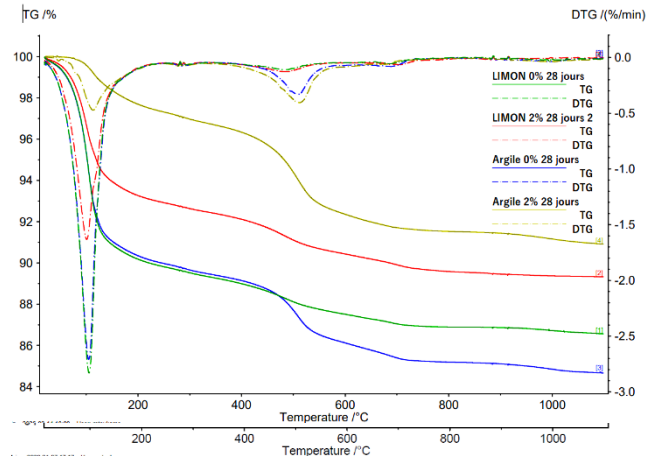


Figure 10: Courbes TG/DTG des mélanges sol-ciment avec et sans dispersants à 28 jours.

3.6 Analyses microstructurales

Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) couplées à des analyses par spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) ont été réalisées afin d'identifier d'éventuelles modifications microstructurales induites par l'ajout de dispersant. Pour les bétons de limon, à l'échelle micrométrique (20µm), les images MEB des deux formulations diffèrent. Les bétons de référence présentent des pores davantage comblés par les C-S-H, CA-S-H et ettringites que les bétons contenant des dispersants (Figures 11 a, 11 b). Cette observation corrobore l'idée que le l'ajout de dispersant à ces dosages limite la production d'hydrates. Les cartographies EDS des deux bétons révèlent d'ailleurs une présence accrue de

micropores accentués dans les bétons avec dispersant (Figure 12). Il s'agit de cartographies présentant les éléments principaux (Aluminium, Silice, Sodium, Calcium, soufre) dans les bétons, les zones en noir représentant des vides. Bien que les résultats de porosité accessible à l'eau montrent que les bétons avec dispersant sont moins poreux, les observations microscopiques révèlent néanmoins la présence d'une microporosité fine liée à une présence moindre d'hydrates à 28 jours. Il s'agit des observations les plus significatives réalisées à cet âge.

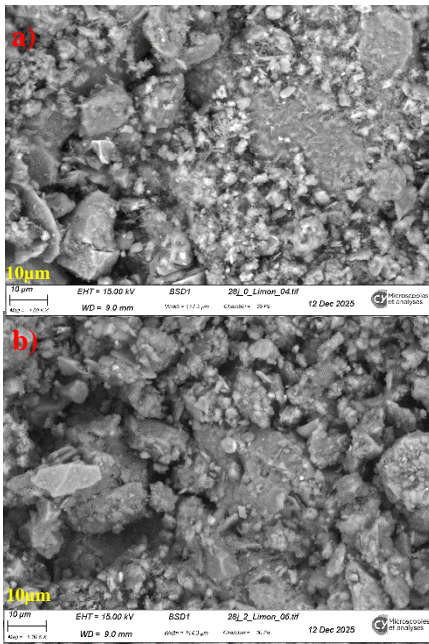


Figure 11: Images des mélanges limon-ciment avec et sans dispersants à 28 jours : a) 0% d'ajout b) 2% d'ajout

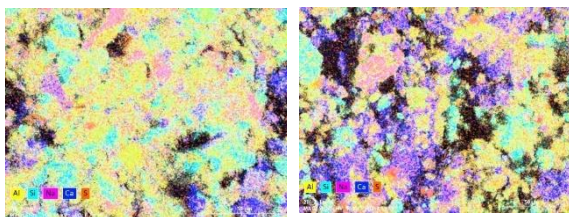


Figure 12: Répartition des éléments des bétons de limon des plateaux : à gauche 0% de dispersant et à droite 2% de dispersant

4 CONCLUSIONS

En conclusion, ce travail a porté sur l'influence de l'ajout d'agents dispersants sur la fluidité des mélanges sol-ciment à base de limon des plateaux et d'argile panachée. Les principaux enseignements sont les suivants :

- Il faut un dosage élevé en additifs pour observer des améliorations de fluidité (>2% par rapport à la masse de sol)

- Les superplastifiants sont plus efficaces lorsqu'ils sont ajoutés au liant et non sol en phase de prémélange.
- Le dispersant (ACP 226) améliore la fluidité des mélanges sol-ciment, son efficacité dépend du type d'argile présent dans le sol, et l'ajout de plus de 3% ralentit fortement la prise des ciments CEM III/C.
- A l'échelle microscopique, à 28 jours, les observations principales faites sur les images MEB et les cartographies EDS, sont la présence d'une microporosité accrue dans les formulations avec dispersant due à une moindre formation de gel C-S-H.
- L'ajout de dispersant limite le développement des résistances mécaniques dans les mélanges sol-ciment même lorsque les teneurs en eau sont réduites.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'organisme de financement, la FNTF pour son soutien financier. Le projet présenté dans cet article est soutenu par la FNTF et FAYAT Fondations.

Les analyses microscopiques ont été réalisées grâce aux équipements de la Plateforme Microscopies & Analyses, Fédération I-Mat (FR4122) de l'Université de Cergy-Pontoise (France).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. Bideux, « Étude d'un béton de sol à liant bas carbone », thesis, CY Cergy Paris Université, 2025. Consulté le: 22 novembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2025CYUN1364>
- [2] A. Porbaha, S. Shibuya, et T. Kishida, « State of the art in deep mixing technology. Part III: geomaterial characterization », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, vol. 4, n° 3, p. 91-110, janv. 2000, doi: 10.1680/grim.2000.4.3.91.
- [3] N. Denies et N. Huybrechts, « Chapter 11 - Deep Mixing Method: Equipment and Field of Applications », in *Ground Improvement Case Histories*, B. Indraratna, J. Chu, et C. Rujikiatkamjorn, Éd., Butterworth-Heinemann, 2015, p. 311-350. doi: 10.1016/B978-0-08-100191-2.00011-3.
- [4] D. A. Bruce et ECO Geosystems, « An Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Applications », FHWA-RD-99-138, mars 2000. Consulté le: 26 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/40947>

- [5] « Topolnicki General Overview and Advances in DSM Rev | PDF | Geotechnical Engineering | Deep Foundation », Scribd. Consulté le: 26 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scribd.com/document/706724045/Topolnicki-General-Overview-and-Advances-in-DSM-rev-1>
- [6] N. Wongkornchaowalit et V. Lertchirakarn, « Setting Time and Flowability of Accelerated Portland Cement Mixed with Polycarboxylate Superplasticizer », *Journal of Endodontics*, vol. 37, n° 3, p. 387-389, mars 2011, doi: 10.1016/j.joen.2010.11.039.
- [7] D.-F. Zhang, B.-Z. Ju, S.-F. Zhang, L. He, et J.-Z. Yang, « The study on the dispersing mechanism of starch sulfonate as a water-reducing agent for cement », *Carbohydrate Polymers*, vol. 70, n° 4, p. 363-368, nov. 2007, doi: 10.1016/j.carbpol.2007.04.024.
- [8] E. Salvatore, G. Modoni, G. Spagnoli, M. Arciero, M. C. Mascolo, et M. Ochmański, « Conditioning clayey soils with a dispersant agent for Deep Soil Mixing application: laboratory experiments and artificial neural network interpretation », *Acta Geotech.*, vol. 17, n° 11, p. 5073-5087, nov. 2022, doi: 10.1007/s11440-022-01505-9.
- [9] C. M. Ouellet-Plamondon et G. Habert, « Self-Compacted Clay based Concrete (SCCC): proof-of-concept », *Journal of Cleaner Production*, vol. 117, p. 160-168, mars 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.048.
- [10] A. Kamdem Mbopda, « Comportement mécanique et physico-chimique des bétons de sol soumis à haute température », These de doctorat, CY Cergy Paris Université, 2023. Consulté le: 26 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2023CYUN1225>
- [11] M. Devarangadi et M. Uma Shankar, « Effect on engineering properties of ground granulated blast furnace slag admixed with laterite soil, cement and bentonite mixtures as a liner in landfill », *Journal of Cleaner Production*, vol. 329, p. 129757, déc. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129757.
- [12] O. Helson, « Comportement thermo-hydro-mécanique et durabilité des bétons de sol : influence des paramètres de formulation et conditions d'exposition. », phdthesis, Université de Cergy Pontoise, 2017. Consulté le: 26 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-01566852>
- [13] J. Hessouh, « Caractérisations physique et mécanique, et durabilité des bétons de sol : matériaux de laboratoire et matériaux de chantiers », phdthesis, CY Cergy Paris Université, 2021. Consulté le: 26 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-03635416>
- [14] « Dispersion characteristics of montmorillonite, kaolinite, and hick clays in waters of varying quality, and their control with phosphate dispersants [Geology - Hydrogeology] - Geotechpedia ». Consulté le: 22 novembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://geotechpedia.com/Publication/Show/3390/dispersion-characteristics-of-montmorillonite--kaolinite--and-hick-clays-in-waters-of-varying-quality--and-their-control-with-phosphate-dispersants>
- [15] « Mechanism and Influence of Dispersants on the Action of Polymer Flocculants Used in Slurry Separation ». Consulté le: 22 novembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/20/4073>
- [16] P. B. Mas, « Intercalation mechanism of polycarboxylate-based superplasticizers into montmorillonite clays », janv. 2019, Consulté le: 22 novembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.academia.edu/80773608/Intercalation_mechanism_of_polycarboxylate_based_superplasticizer_s_into_montmorillonite_clays
- [17] L. Lei, M. Palacios, J. Plank, et A. A. Jeknavorian, « Interaction between polycarboxylate superplasticizers and non-calcined clays and calcined clays: A review », *Cement and Concrete Research*, vol. 154, p. 106717, avr. 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106717.
- [18] R. Huang, L. Xu, Z. Xu, Q. Zhang, et J. Wang, « A Review on Concrete Superplasticizers and Their Potential Applications for Enhancing the Performance of Thermally Activated Recycled Cement », *Materials (Basel)*, vol. 17, n° 17, p. 4170, août 2024, doi: 10.3390/ma17174170.